

Desenvolvimento do Cabeça-de-Série do Sistema para Manutenção Preditiva de Hidrogeradores

Luis Claudio Ribeiro, Cláudio Oliveira Santos, Erik Leandro Bonaldi, Camila Paes Salomon, Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Jonas Guedes Borges da Silva, Wilson Cesar Sant'Ana, Germano Lambert-Torres, Luiz Eduardo Borges da Silva

Resumo – Este artigo apresenta o cabeça-de-série do sistema de supervisão e diagnóstico preditivo das condições de degradação dos hidrogeradores da Usina Hidrelétrica de Itapebi, do Grupo Neoenergia. Este trabalho deu continuidade ao desenvolvimento do sistema para manutenção preditiva dos hidrogeradores de Itapebi, com o intuito de se desenvolver um protótipo aperfeiçoado (cabeça-de-série) para o monitoramento das unidades hidrogeradoras visando ao diagnóstico de falhas através da Análise da Assinatura Elétrica. Dentre os objetivos específicos, considerou-se a melhoria da especificidade do protótipo (tanto software quanto hardware), o desenvolvimento de um sistema automático de classificação de eventos e falhas, e a montagem de um laboratório de atualização do protótipo e simulação de falhas em hidrogeradores. Por fim, apresenta-se, a título de exemplo, a análise dos dados reais da unidade geradora UG#2 de Itapebi obtidos com o cabeça-de-série.

Palavras-chave – Manutenção Preditiva, Medidas Elétricas, Processamento de Sinais, Sistemas Automáticos, Sistemas de Medição.

I. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna é cada vez mais dependente do suprimento de energia elétrica e, acompanhando este aumento da demanda, vem o aumento do tamanho e da complexidade do sistema. O gerador síncrono é um elemento fundamental no processo de geração de energia elétrica. A condição operacional desta máquina afeta a confiabilidade do suprimento de energia e a estabilidade do sistema de potência. Logo, estas máquinas merecem preocupações especiais para se aumentar a confiabilidade do processo de geração de energia como um todo. Nos geradores modernos, empregam-se rotineiramente equipamentos de proteção e monitoramento para prevenir danos ao gerador e, logo, paradas não-programadas [1].

Para se evitar paradas não programadas no funcionamento

dos geradores devido a uma contingência não programada, diversos procedimentos de manutenção foram desenvolvidos ao longo dos últimos quarenta anos [2]. Dentre estas técnicas, destaca-se a *manutenção preditiva*, que foi desenvolvida graças ao recente avanço dos sistemas digitais para a aquisição e processamento de sinais. Esta técnica visa ao desenvolvimento de um processo de diagnóstico do equipamento sob supervisão de forma que a indicação para uma intervenção da manutenção seja indicada somente quando o estado operacional do equipamento vier a apresentar uma condição de deterioração importante. Esta indicação pode informar até o nível de deterioração em que o equipamento se encontra e apresentar uma previsão de quanto tempo o mesmo pode continuar funcionando sem que uma pane generalizada venha a acontecer [3, 4].

Em [2], foi proposto o desenvolvimento de uma metodologia inteligente para manutenção preditiva de hidrogeradores, em que foi desenvolvido o protótipo de um sistema para detecção de falhas elétricas e mecânicas através da análise dos espectros de tensão e corrente do hidrogerador. Além disso, desenvolveu-se um software de mineração de dados para classificação de falhas baseado na Teoria de Conjuntos Aproximados. A instalação do protótipo e os testes foram realizados na Usina Hidrelétrica de Itapebi.

O equipamento desenvolvido para supervisão e diagnóstico preditivo das condições operacionais dos hidrogeradores foi baseado no processamento digital das informações contidas nas variáveis elétricas envolvendo o funcionamento da máquina. Com base nas informações obtidas pelas correntes e tensões, esperava-se poder inferir sobre as condições operacionais do equipamento, pois o padrão envolvendo o comportamento das variáveis monitoradas apresenta algum grau de correlação com a deterioração das condições operacionais do mesmo.

O sistema constava basicamente de transdutores de corrente e tensão, um circuito de condicionamento de sinais para adequar o sinal medido ao circuito de aquisição de dados, um circuito de conversão analógico/digital de alta velocidade e resolução, um microprocessador tipo DSP para o processamento e armazenamento das variáveis elétricas medidas e de um programa inteligente de consolidação dos dados, avaliação e diagnóstico da condição operacional do equipamento.

O método utilizado para a identificação e previsão de falhas no hidrogerador foi baseado em ESA (*Electrical Signature Analysis*), que abrange as técnicas de CSA (*Current Signature Analysis*), VSA (*Voltage Signature Analysis*) e

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, no projeto 0453-0012.

L. C. Ribeiro e C. O. Santos trabalham no Grupo Neoenergia - Usina Hidrelétrica Itapebi (e-mail: {lribeiro, claudio.santos}@neoenergia.com).

L. E. Borges da Silva, E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, J. G. B. da Silva, C. P. Salomon, W. C. Sant'Ana e G. Lambert-Torres são pesquisadores do CGTI - Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação e Instituto Gnarus (e-mails: {leborgess, erik.bonaldi, levy.oliveira, jonas.borges, camsalomon, wilson.cesar.santana, germanoltorres}@gmail.com).

EPVA (*Extended Park Vector's Approach*). A análise CSA vem sendo utilizada com sucesso em motores de indução, e é útil na detecção de avarias mecânicas do gerador e no conjunto rotativo. No caso de falhas elétricas, torna-se importante a análise de EPVA e a análise VSA [5, 6].

Este artigo apresenta a continuação do trabalho proposto em [2], visando ao aperfeiçoamento do protótipo desenvolvido, caracterizado como cabeça de série, principalmente em relação à melhoria da especificidade do protótipo (tanto software quanto hardware) face aos módulos de falhas obtidos; desenvolvimento de um sistema automático de classificação de falhas e eventos; e a montagem de um laboratório de atualização do protótipo e simulação de falhas em hidrogeradores, incluindo a comprovação dos padrões de falha levantados.

Na próxima seção, mostra-se uma visão geral do cabeça-de-série, com destaque para as melhorias realizadas. Em seguida, descreve-se o laboratório de modelo reduzido, e apresentam-se os padrões de falhas levantados e os resultados de laboratório. Finalmente, apresenta-se a análise dos sinais reais coletados com o cabeça-de-série instalado na unidade geradora UG#2 da Usina Hidrelétrica de Itapebi.

II. VISÃO GERAL DO CABEÇA-DE-SÉRIE

A. Transdutores de Tensão

Em [2] (projeto relativo ao protótipo), foi desenvolvido um transdutor de tensão com capacidade de medição de tensões CA e CC, tendo-se em vista as tensões estatóricas (CA) e de excitação (CC). Nas visitas à planta, no entanto, verificou-se a inviabilidade de medição da corrente e da tensão de excitação. Além disto, o transdutor desenvolvido necessitava de uma fonte de alimentação simétrica de $\pm 12V_{CC}$, o que ocuparia mais espaço nos painéis e dificultaria mais a instalação. Desta forma, optou-se por alterar o projeto interno do transdutor de modo que as tensões estatóricas ainda pudessem ser medidas, mas que não houvesse necessidade de alimentação dos transdutores. Externamente, o transdutor continuou basicamente o mesmo, mas, internamente, o transdutor passou a utilizar um transformador de medição de 480V/0,707V ao invés do transdutor de efeito Hall, LV-25P da LEM.

B. Transdutores de Corrente

Seguem as especificações do transdutor de corrente escolhido:

- Núcleo bipartido;
- Escala de 50 AC com saída em tensão compatível com a entrada do hardware de aquisição;
- Acuidade $\pm 1\%$;
- Erro de linearidade 0.1%;
- Defasagem: $1.5^\circ \pm 1^\circ$;
- Tensão de operação: 300 V_{AC} em cabo nu;
- Temperatura de operação: $-25^\circ C$ a $70^\circ C$;
- Dimensões: 36,5 X 54 X 31,5 mm;
- Diâmetro da janela interna: 8 mm;
- Peso: 80 g.

C. Placas de Aquisição

Por uma questão de atualização tecnológica e otimização

de recursos, foi especificado um novo sistema de aquisição de dados composto pelos módulos de aquisição CDAQ-9181 e NI-9239. Segue a especificação resumida do sistema:

- 4 canais de entrada analógica de $\pm 10V$;
- Amostragem simultânea de 50ks/s por canal;
- Resolução de 24 bits e isolamento entre canais;
- Interface Ethernet de 10/100MBPS;
- Temperatura máxima de operação: $70^\circ C$;
- Temperatura mínima de operação: $-40^\circ C$.

D. Instalação dos Cabeças-de-Série

Os cabeças-de-série foram montados e testados para instalação nas unidades geradoras UG#1 e UG#2 da Usina Hidrelétrica de Itapebi (a unidade UG#3 já estava com um protótipo instalado através do projeto anterior [2]) e no laboratório de modelo reduzido.

Os cabeças-de-série foram instalados em Novembro de 2012 na Usina Hidrelétrica de Itapebi. A Figura 1(a) e a Figura 1(b) mostram, respectivamente, os transdutores de tensão e placa de aquisição de dados bem como os transdutores de corrente dos cabeças-de-série no painel de instalação.



Figura 1. Instalação do cabeça-de-série no painel: (a) sistema de aquisição de dados e transdutores de tensão, (b) transdutores de corrente.

E. Correções e Melhorias no Pacote Computacional

Por se tratar de um projeto na fase de cabeça-de-série, foram considerados aspectos relativos ao aperfeiçoamento do protótipo obtido no projeto de P&D anterior [2]. Desta forma foram realizadas correções e melhorias no pacote computacional no sentido de se aprimorar o protótipo desenvolvido, visando a transformá-lo futuramente em um produto de mercado.

Na persecução deste objetivo, adotou-se a seguinte metodologia: A) Levantamento e organização das alterações a serem feitas no programa computacional; B) Avaliação de todas as correções a serem feitas, onde as mesmas foram reproduzidas em ambiente controlado e a sua causa foi identificada no código fonte; C) Avaliação dos requisitos e alterações a serem feitas na interface DAQmx de comunicação com o protótipo cabeça-de-série; D) Implementação das correções e melhorias no código fonte do pacote computacional e E) Verificação de todas as alterações feitas, para garantir a sua correta implementação.

As correções necessárias foram realizadas. Foram também implementadas as seguintes melhorias de software: A) Melhorias na IHM (interface homem máquina); B) Novas funcionalidades e C) Melhorias no núcleo do programa. Além disso, foi desenvolvida a Interface de Comunicação com o Protótipo.

F. Desenvolvimento do Software de Comunicação com a Rede de Dados

A comunicação entre o software “Itapebi – Sistema de Monitoramento de Hidrogeradores” e o protótipo de aquisição de dados é efetuada através de uma comunicação TCP/IP via uma conexão de rede ethernet. Tanto o protótipo desenvolvido em [2], como o cabeça-de-série são baseados nos dispositivos de aquisição de dados National Instruments, e toda essa comunicação é feita através dos “drivers” proprietários da National Instruments.

Através do desenvolvimento de classes e estruturas baseadas na interface *DAQmx*, o sistema de monitoramento efetua a comunicação com o protótipo e a aquisição de dados. Tais classes e interfaces foram desenvolvidas e testadas em [2], especificamente para o dispositivo NI ENET- 9234.

O cabeça-de-série é baseado no dispositivo NI cDAQ-9181 por uma questão de atualização tecnológica. O mesmo representa um “chassis” com conectividade de rede, que recebe diferentes tipos de módulos de aquisição de dados. As suas especificações são muito parecidas com o NI ENET-9234 e, portanto, boa parte do código das estruturas e classes desenvolvidas pôde ser aproveitada. Contudo, para que as estruturas de comunicação fossem compatíveis com o cabeça-de-série, foram feitas as devidas alterações e melhorias.

G. Desenvolvimento do Sistema de Diagnóstico Automático de Falhas

Uma das principais limitações do protótipo, desenvolvido em [2], estava relacionada à forma com que as aquisições de sinais eram efetuadas. O software de análise desenvolvido, apesar de oferecer ferramentas completas de visualização e análise de falhas, só era capaz de efetuar aquisições de forma automática quando a máquina estava com um usuário “logado”, com o programa de análise em execução e com um hidrogerador carregado. Por isso, a necessidade de intervenção e acompanhamento por parte do operador era constante. Para que uma agenda de coleta de sinais seja efetuada de forma consistente e independente do usuário, foi necessário o desenvolvimento de uma ferramenta adicional para automatizar este processo e eliminar alguns aspectos que se pudessem requerer ações do operador.

Devido aos requisitos definidos para esta ferramenta, a equipe do projeto optou por desenvolver a ferramenta em forma de um Serviço do Windows. No caso do Sistema para Manutenção Preditiva de Hidrogeradores, o desenvolvimento da ferramenta em forma de serviço permite que todas as rotinas de aquisição e processamento de dados sejam executadas independentemente do usuário. Com isso, desde que o computador onde a ferramenta estiver instalada (o servidor) esteja ligado, a ferramenta se encarregará de efetuar as aquisições de acordo com as agendas definidas, e processá-las a fim de identificar falhas nos hidrogeradores sendo monitorados.

III. DESCRIÇÃO DO LABORATÓRIO DE MODELO REDUZIDO

A. Especificação do Laboratório de Modelo Reduzido

O objetivo do laboratório de modelo reduzido era a ob-

tenção de uma bancada de máquinas elétricas rotativas de pequeno porte, de forma que falhas elétricas e mecânicas pudessem ser introduzidas em uma máquina síncrona com rotor de pólos salientes, operando como gerador, de forma a simular o comportamento de hidrogeradores em operação e o efeito dessas falhas nos mesmos.

A Figura 2 mostra um esquema básico ilustrativo do funcionamento da bancada de máquinas elétricas rotativas de pequeno porte que compõem o laboratório. A bancada de máquinas é composta por uma máquina assíncrona (motor de indução) alimentada por um inversor de frequência, sendo esta máquina utilizada como a força motriz do sistema. O motor de indução é acoplado a uma pequena máquina síncrona de pólos salientes que, acionada pela força motriz, funciona como gerador. O gerador síncrono, por sua vez, é conectado a uma carga composta por elementos resistivos, capacitivos e/ou indutivos, para simular uma situação semelhante à de uma carga real do sistema de potência.

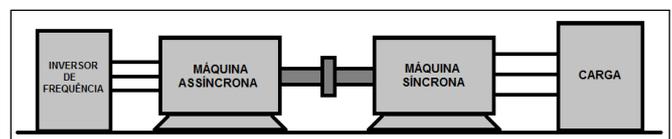


Figura 2. Esquema básico do laboratório de modelo reduzido.

Em relação aos defeitos a serem inseridos na máquina, tem-se:

- No estator, são simuladas falhas de curto-circuito entre espiras, podendo também ser simulados curto-circuito parcial entre o estator e a carcaça da máquina, e parte do estator em aberto. Estas falhas são inseridas através da utilização de elementos passivos (resistores, capacitores ou indutores).
- No rotor, são simuladas falhas de curto-circuito entre espiras, tendo-se também a possibilidade de deixar espiras em aberto. Estas falhas também são inseridas através da utilização de elementos passivos.
- Para simulação de desbalanceamento, é utilizado um volante de aço com furos simétricos, usinado e incorporado ao motor de indução. O desbalanceamento é obtido inserindo-se um ou mais parafusos no volante.

B. Visão Geral do Laboratório de Modelo Reduzido

A Figura 3 mostra uma visão geral do laboratório de modelo reduzido desenvolvido, incluindo a bancada de máquinas (à esquerda) e o painel de comando e simulação de falhas (à direita). Nos próximos itens, serão apresentados os componentes de cada parte do laboratório de modelo reduzido, bem como a montagem e a operação do mesmo.



Figura 3. Visão geral do laboratório de modelo reduzido.

C. Partes Componentes da Bancada de Máquinas

Têm-se a seguir os principais itens que compõem a bancada de máquinas:

- Gerador síncrono trifásico, com as seguintes especificações: potência 1 CV; tensão 220 / 380 V; frequência 60 Hz; 4 pólos; tensão de excitação 220 V_{cc}; velocidade 1800 rpm; rotor de pólos salientes.
- Motor acionador trifásico do tipo máquina assíncrona (motor de indução), com as seguintes especificações: potência 1,5 CV; alto rendimento; tensão 220 / 380 V; frequência 60 Hz; 4 pólos; velocidade 1800 rpm; rotor do tipo gaiola de esquilo.
- Volante de aço carbono com 4 furos simétricos usinado e incorporado ao motor de indução trifásico, podendo ser desbalanceado colocando-se (um ou mais) parafusos do volante.
- Conjunto de acoplamento do tipo luva elástica.
- Base de montagem para duas máquinas.

D. Partes Componentes do Painel de Comando e Simulação de Falhas

Tem-se a seguir os principais itens que compõem o painel de comando e simulação de falhas:

- Disjuntor e acesso às fases de alimentação;
 - Bornes para a conexão do estator da máquina assíncrona;
 - Bornes para a conexão do estator da máquina assíncrona com o inversor de frequência e controle remoto para o inversor de frequência;
 - Inversor de frequência;
 - Bornes para conexão do estator da máquina síncrona, incluindo bornes nos taps para inserção de defeitos;
 - Bornes para conexão do rotor da máquina síncrona, incluindo bornes nos taps para inserção de defeitos;
 - Bornes de acesso e representação dos elementos passivos resistivos, capacitivos e indutivos para a simulação de falhas;
 - Conversor CA / CC, incluindo bornes de acesso e potenciômetro de controle, para alimentação da excitatriz da máquina síncrona.
- painel.

E. Cargas Didáticas

Foram especificadas para o simulador cargas didáticas trifásicas resistiva, indutiva e capacitiva, com potência compatível com a potência nominal fornecida pela máquina síncrona; tensão 220 [V]; comutadas por chaves rotativas em 5 passos e podendo em cada passo a carga ser desbalanceada.

F. Sistema de Transdução e Aquisição de Dados

Para a transdução e aquisição de dados, é utilizado um cabeça-de-série do sistema de monitoramento de hidrogenadores, conforme descrito na seção II.

G. Montagem do Laboratório de Modelo Reduzido

Primeiramente, os cabos de alimentação das máquinas foram conectados à parte traseira do painel, de forma que a bancada de máquinas fosse conectada ao painel, como mostra a Figura 3. Em seguida, foram feitas as conexões dos enrolamentos do estator do motor de indução e da máquina síncrona, sendo o primeiro alimentado pelo inversor e o úl-

timo conectado à carga didática utilizada. O enrolamento do rotor da máquina síncrona foi alimentado através do conversor CA/CC do painel. Obteve-se a configuração apresentada na Figura 4(a). Finalmente, foi feita a montagem do sistema de transdução e aquisição de dados no painel, incluindo as conexões dos transdutores de tensão e corrente e da placa de aquisição de dados. A Figura 4(b) mostra a configuração obtida.

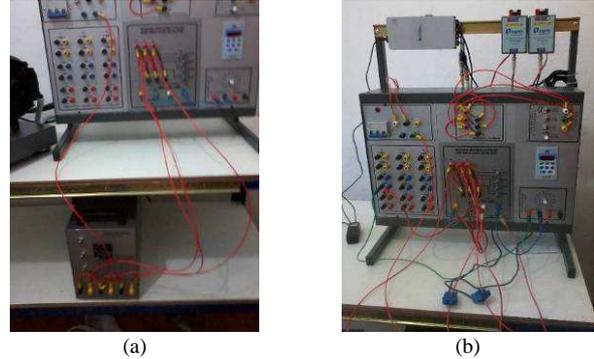


Figura 4. Montagem do laboratório de modelo reduzido: (a) conexões no painel de comando e simulação, (b) montagem do sistema de transdução e aquisição de dados.

H. Operação da Bancada

Para se operar o laboratório de modelo reduzido para simular defeitos no gerador síncrono, deve-se primeiramente criar um hidrogenador no software “Itapebi – Sistema de Monitoramento de Hidrogenadores”, desenvolvido em [2] e atualizado nesta continuidade do projeto. Deve-se configurar este hidrogenador conforme os dados nominais da máquina síncrona do laboratório reduzido, e configurar a parte de aquisição de dados de acordo com o sistema utilizado.

Deve-se alimentar a bancada. É importante se conectar um osciloscópio ou multímetro na saída do estator da máquina síncrona, para se monitorar sua tensão. Alimenta-se a placa de aquisição bem como o sistema de ventilação da carga resistiva. Configura-se a carga na posição desejada, utilizando a chave rotativa de cinco passos. O inversor de frequência é ligado próximo de 60 Hz para acionar o motor de indução. Ajusta-se a excitatriz (conversor CA / CC) e o inversor para se obter na máquina síncrona uma tensão de fase de saída com 127 V_{RMS} e 60 Hz. Utilizando o software, podem-se fazer as aquisições de dados desejadas.

Para a simulação de falha de excentricidade dinâmica, antes de iniciar a operação da bancada, deve-se inserir um parafuso em um dos orifícios do volante de aço da bancada, como mostra a Figura 5.



Figura 5. Inserção de parafuso no volante de aço.

Para a simulação de falhas elétricas (curto-circuito no enrolamento estatórico ou curto-circuito no enrolamento rotórico), antes de se iniciar a operação da máquina síncrona, deve-se conectar um elemento passivo entre os taps do enro-

lamento da máquina síncrona em que a falha será inserida. A Figura 6 mostra o exemplo da inserção do elemento passivo R4 entre os taps C e D do enrolamento estatórico.

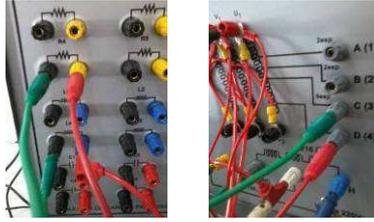


Figura 6. Exemplo de inserção de falha no enrolamento estatórico da máquina síncrona.

IV. REVISÃO DOS PADRÕES DE FALHA E RESULTADOS DE LABORATÓRIO

Esta seção apresenta uma revisão sobre os padrões de falha levantados para hidrogeradores e os resultados obtidos utilizando o laboratório de modelo reduzido.

Para a simulação das falhas, utilizaram-se os elementos passivos resistivos $R4 = 100 [\Omega]$, $R3 = 10 [\Omega]$, $R1 = 1 [\Omega]$ e cabo banana (simulando R0, o curto-circuito). As falhas no enrolamento estatórico foram inseridas entre os taps C e D, e o enrolamento inteiro é representado pelo trecho U1U2. O trecho CD representa cerca de 8,4% do enrolamento total U1U2. As porcentagens de falhas de acordo com os elementos inseridos nesse trecho são apresentadas na Tabela . Já no caso das falhas no enrolamento rotórico, estas foram inseridas entre os taps F e G, sendo que o enrolamento inteiro é representado pelo trecho GH. O trecho FG representa cerca de 50,0% do enrolamento total GH. As porcentagens de falhas de acordo com os elementos inseridos nesse trecho são apresentadas na Tabela . Para a simulação de desbalanceamento mecânico, utilizou-se um parafuso inserido em um dos orifícios do volante de aço, como mostrado na Figura 5.

Tabela I. Severidade das Falhas no Enrolamento Estatórico no Trecho CD

Condição de Falha	R4	R3	R1	R0
Porcentagem de Falha	0,1%	0,7%	4,0%	8,4%

Tabela II. Severidade das Falhas no Enrolamento Rotórico no Trecho FG

Condição de Falha	R4	R3	R1
Porcentagem de Falha	9,0%	34,0%	46,0%

A condição de carga na máquina síncrona utilizada foi resistiva indutiva, por ser mais próxima à carga real de um hidrogerador. Para cada caso, efetuaram-se cinco aquisições de dados, utilizando o software “Itapebi – Sistema de Monitoramento de Hidrogeradores”, e, posteriormente, carregaram-se as curvas de tendência de cada padrão de falha.

A. Curto-circuito no Enrolamento Estatórico

Os padrões levantados para este tipo de falha foram os harmônicos de seqüência zero e os desequilíbrios estatísticos do EPVA, como mostram a Figura 7(a) e a Figura 7(b), respectivamente.

A Figura 8 e a Figura 9 mostram, respectivamente as curvas de tendência obtidas para os harmônicos de seqüência zero na tensão e na corrente. Nota-se que o padrão respondeu, ou seja, houve um aumento gradual das componentes de acordo com o aumento da severidade de falha. Houve uma exceção das componentes da condição de falha R3, em

que se supõe ter ocorrido uma compensação do desequilíbrio elétrico, devido a alguma característica intrínseca da inserção desta resistência.

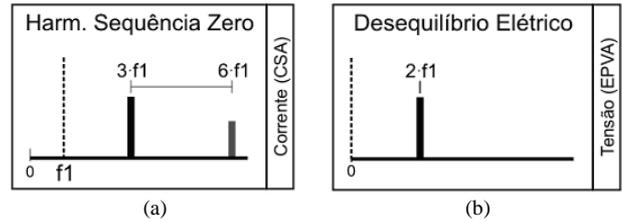


Figura 7. Padrões de curto-circuito no enrolamento estatórico: (a) harmônicos de seqüência zero, (b) desequilíbrio elétrico no EPVA.

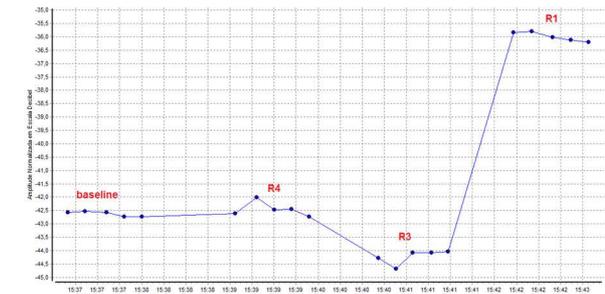


Figura 8. Tendência dos harmônicos de seqüência zero na tensão.

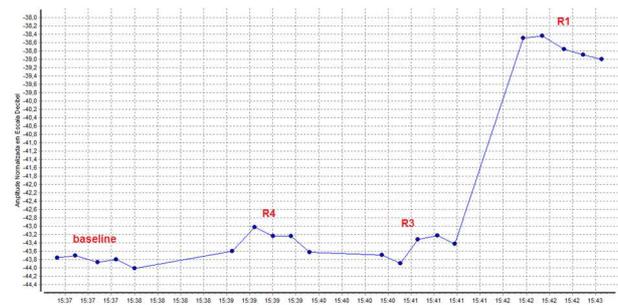


Figura 9. Tendência dos harmônicos de seqüência zero na corrente.

A Figura 10 e a Figura 11 mostram as curvas de tendência do desequilíbrio elétrico do EPVA para tensão e corrente, respectivamente. Nota-se que o padrão respondeu corretamente em ambos os casos.

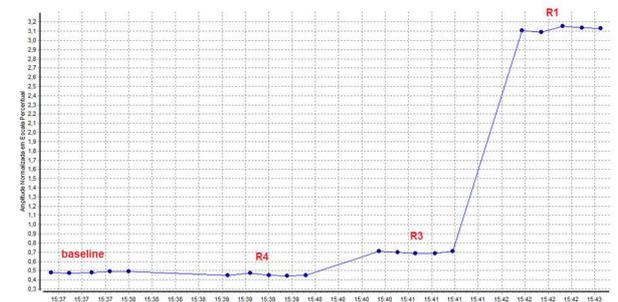


Figura 10. Tendência do desequilíbrio elétrico do EPVA da tensão.

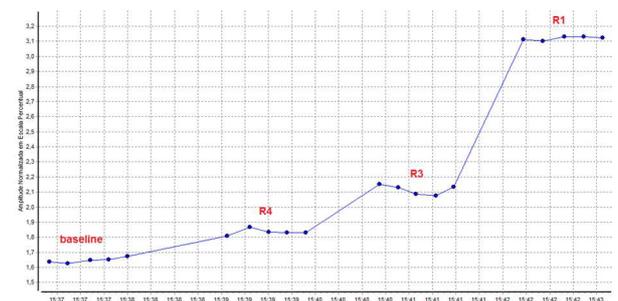


Figura 11. Tendência do desequilíbrio elétrico do EPVA da corrente.

B. Curto-circuito no Enrolamento Rotórico

Os padrões levantados para curto-circuito no enrolamento rotórico foram o padrão da frequência de rotação e os harmônicos pares, como mostram a Figura 12(a) e a Figura 12(b), respectivamente.

A Figura 13 e a Figura 14 mostram as tendências da frequência de rotação na tensão e na corrente, respectivamente, em que se pode notar que o padrão respondeu corretamente, em ambos os casos.

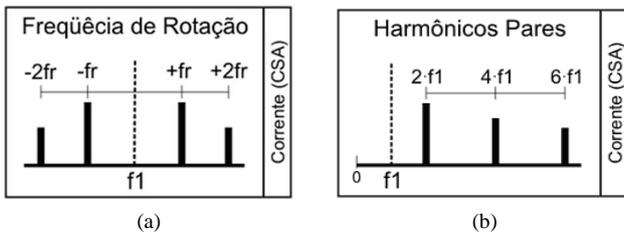


Figura 12. Padrões de curto-circuito no enrolamento rotórico: (a) frequência de rotação, (b) harmônicos pares.



Figura 13. Tendência da frequência de rotação na tensão.

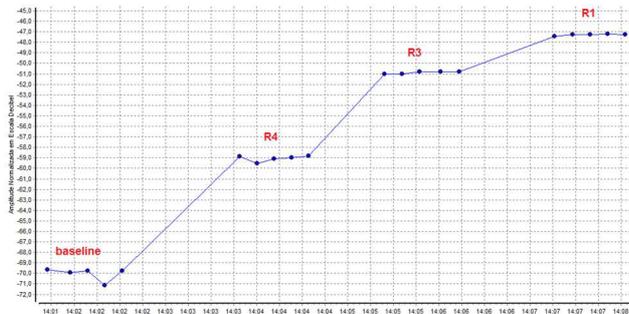


Figura 14. Tendência da frequência de rotação na corrente.

A Figura 15 e a Figura 16 mostram as curvas de tendência dos harmônicos pares na tensão e na corrente, respectivamente. Os padrões responderam corretamente, com exceção das componentes da falha R4 na tensão e da falha R1 na corrente, em que se supõe que houve algum tipo de compensação nos harmônicos pares ou que estes foram influenciados por algum outro fator durante as aquisições.

C. Excentricidade Dinâmica

O padrão verificado para este tipo de falha foi o da frequência de rotação, pois problemas de desbalanceamento mecânico também causam aumento desta componente. Este padrão é ilustrado na Figura 12(a).

A Figura 17 e a Figura 18 mostram as curvas de tendência

da frequência de rotação na tensão e na corrente, respectivamente. Nota-se que para a inserção do parafuso (o que implica em desbalanceamento mecânico), houve um aumento na amplitude da componente, conforme esperado.

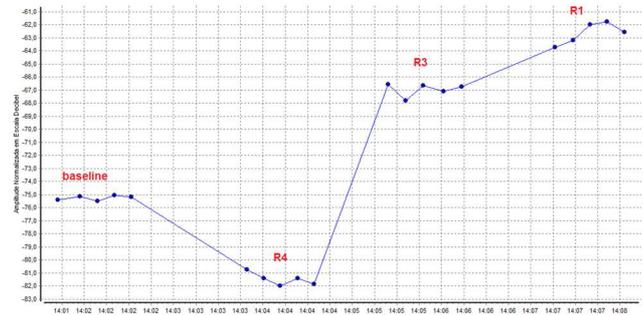


Figura 15. Tendência dos harmônicos pares na tensão.

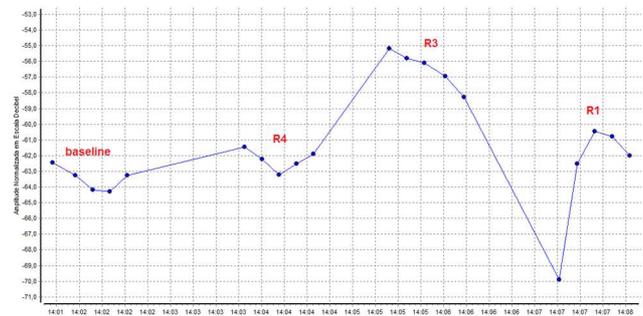


Figura 16. Tendência dos harmônicos pares na corrente.



Figura 17. Tendência da frequência de rotação na tensão.



Figura 18. Tendência da frequência de rotação na corrente.

V. ANÁLISE DOS SINAIS REAIS

Esta seção apresenta a análise dos sinais reais coletados na Usina Hidrelétrica Itapebi, pertencente ao Grupo Neoen-energia. Esta etapa consistiu de se utilizar o software “Itapebi – Sistema de Monitoramento de Hidrogeradores”, de forma

a se analisarem os sinais das unidades geradoras, através das aquisições do banco de dados acumulado pelo cabeça-de-série. Os cabeças-de-série estão em funcionamento nas unidades geradoras UG#1 e UG#2 da usina hidrelétrica de Itapobi, sendo que UG#3 está com o protótipo. Nesta seção será apresentada a análise dos dados de UG#2.

Para o hidrogerador UG#2, têm-se aquisições efetuadas em Novembro de 2012 e Novembro de 2013. A Figura 19 mostra a tela obtida pelo Diálogo de Supervisão do software. Tem-se que a velocidade rotórica e a tensão variam pouco em torno de seus valores nominais, de 138.5 rpm e 13800 V_{RMS}, respectivamente. Já pelos valores de corrente, nota-se que esta condição de operação varia entre 56% a 95% da carga nominal, de 6693.9 A.

Para se exemplificar a análise da assinatura elétrica do hidrogerador UG#2, tomou-se uma aquisição realizada em 12/11/2013.

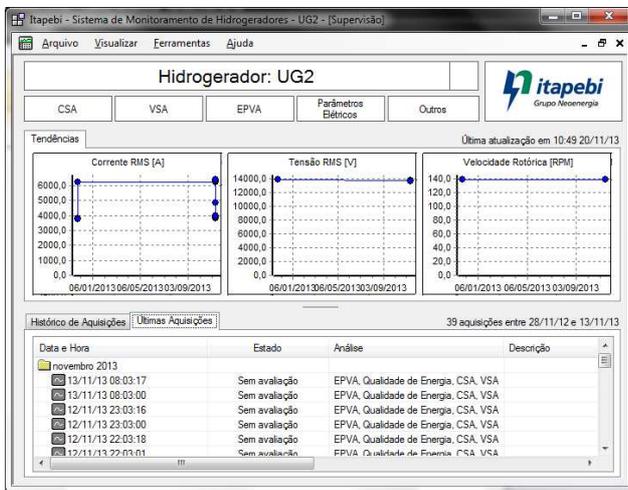


Figura 19. Tela de supervisão, UG#2.

A. Curto-circuito no Enrolamento Estático

Para esta falha, começou-se por verificar o padrão do desequilíbrio elétrico no EPVA, ilustrado na Figura 20.

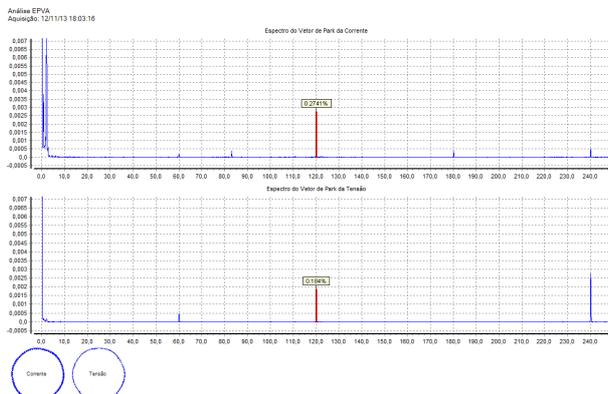


Figura 20. Desequilíbrio elétrico no EPVA, UG#2.

Outro padrão é acompanhar os harmônicos de seqüência zero na assinatura de corrente, correlacionando à assinatura de tensão. A Figura 21 destaca os harmônicos de seqüência zero na corrente e na tensão.

Por último, acompanhou-se o padrão de frequência central $CF = Re * fr$ (onde Re é o número de ranhuras estáticas e fr é a frequência de rotação), com bandas laterais na fre-

quência de geração moduladas pela frequência de rotação. A Figura 22 destaca estas componentes nas análises CSA e VSA.

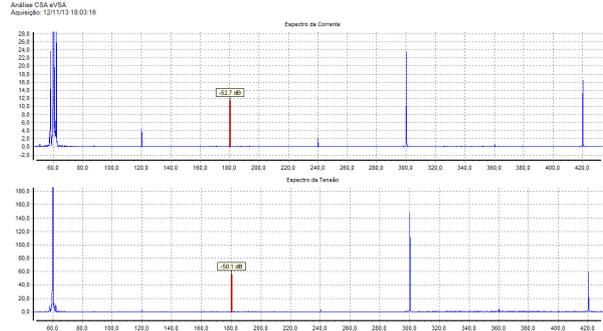


Figura 21. Harmônicos de seqüência zero, UG#2.

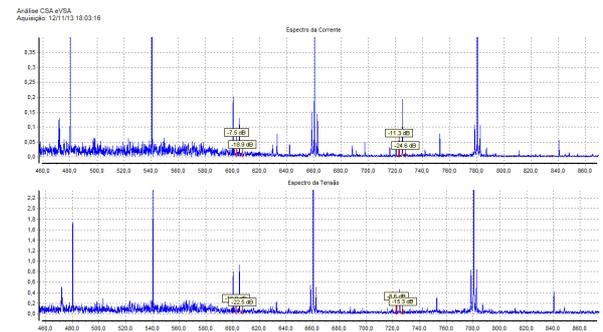


Figura 22. Padrão da frequência central do estator, UG#2.

B. Curto-circuito no Enrolamento Rotórico

Para esta falha, começou-se verificando o padrão da frequência de rotação, conforme mostra a Figura 23, nas assinaturas de corrente e tensão. Nota-se que as componentes da frequência de rotação estão imersas no nível do ruído e não há a proeminência de uma componente específica.

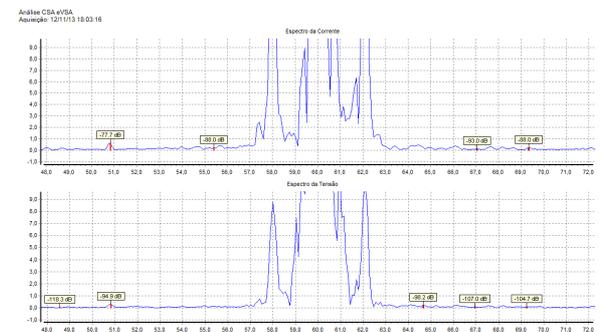


Figura 23. Padrão da frequência de rotação, UG#2.

Outro padrão para esta falha foi o acompanhamento dos harmônicos pares nas assinaturas de corrente e tensão, como mostra a Figura 24.

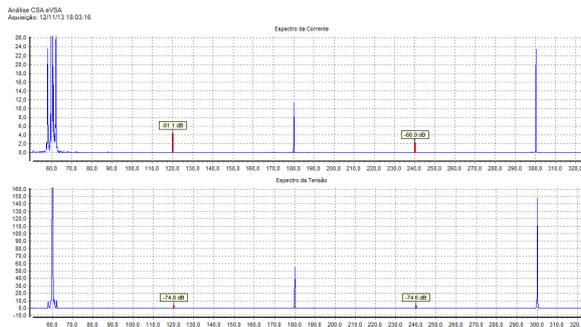


Figura 24. Harmônicos pares, UG#2.

C. Falhas Mecânicas no Estator

O padrão apresentado para esta falha é o acompanhamento da frequência central do estator, com bandas laterais na frequência de geração. A Figura 25 destaca estas componentes nas análises CSA e VSA.

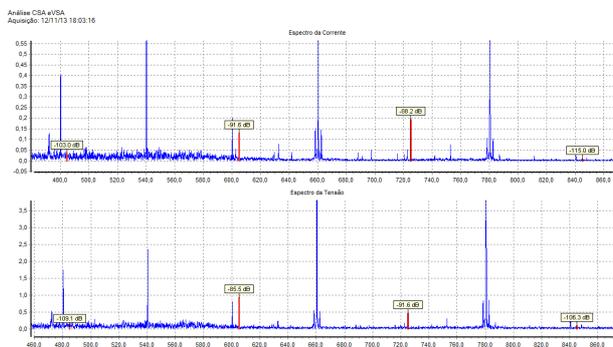


Figura 25. Padrão da frequência central do estator, UG#2.

VI. CONCLUSÕES

Conclui-se que este trabalho apresentou o cabeça de série de um sistema para manutenção preditiva de hidrogeradores, sendo uma continuação do desenvolvimento proposto em [2]. Foram implementadas melhorias no hardware e software do cabeça-de-série. Foi desenvolvido um laboratório de modelo reduzido para inserção de falhas em uma pequena máquina síncrona de pólos salientes, simulando o comportamento de um hidrogerador. Os resultados obtidos foram apresentados e foi possível a comprovação dos padrões de falha levantados. Como uma observação, tem-se que as componentes proeminentes citadas não implicam no acontecimento da falha. É necessário acompanhar a tendência destas componentes antes de se chegar a um diagnóstico.

Finalmente, tem-se que os cabeças-de-série encontram-se em pleno funcionamento nas unidades geradoras UG#1 e UG#2 da Usina Hidrelétrica de Itapebi, sendo que a unidade UG#3 está com um protótipo instalado. Através dos dados coletados com o cabeça-de-série, apresentou-se uma análise da condição do hidrogerador UG#2.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Penman e H. Jiang, "The Detection of Stator and Rotor Winding Short Circuits in Synchronous Generators by Analysing Excitation Current Harmonics", *Proceedings of Opportunities and Advances in International Power Generation*, no. 419, pp. 137-142, 1996.
- [2] L. C. Ribeiro, M. A. M. Gutierrez, E. G. da Silva, L. E. Borges da Silva, E. L. Bonaldi, L. E. L. de Oliveira, J. G. Borges da Silva e G. Lambert-Torres, "Desenvolvimento de uma Metodologia Inteligente para Manutenção Preditiva de Hidrogeradores", Anais do VI Con-

gresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – CITENEL, 2011.

- [3] E. L. Bonaldi, "Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados", Tese de Doutorado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [4] A. J. M. Cardoso, *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*, Coimbra: Coimbra Editora, 1991.
- [5] M. H. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [6] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, "Diagnosis of the Multiple Induction Motor Faults Using Extended Park's vector Approach" in *International Journal of Comadem*, pp 19-25, 2001.